

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

**VIIDENNEN SUKUPOLVEN HÄVITTÄJIEN HÄIVETEKNOLOGIA**

Kandidaatintutkielma

Kadettialikersantti  
Henri Lindberg

98. kadettikurssi  
Ilmasotalinja

Maaliskuu 2014

## MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

|   |  |
|---|--|
| Kurssi<br>Kadettikurssi 98  | Linja<br>Ilmasotalinja                                     |
| Tekijä<br>Kadettialikersantti Henri Lindberg  |  |
| Tutkielman nimi<br><b>Viidennen sukupolven hävittäjien häiveteknologia</b>  |  |
| Oppiaine, johon työ liittyy<br>Sotatekniikka  | Säilytyspaikka<br>Maanpuolustuskorkeakoulun kurssikirjasto |
| Aika<br>Maaliskuu 2014  | <b>Tekstisivuja 27</b> <b>Liitesivuja 5</b>                |
| <b>TIIVISTELMÄ</b><br><br><p>Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää viidennen sukupolven hävittäjien häiveteknologian toteutusratkaisuja. On käsitelty miksi häiveteknologiaa tarvitaan sekä vertailtu miten häiveteknologia toteutetaan viidennen sukupolven hävittäjissä. Suomen ilmavoimien päähävittäjäkalusto F/A-18 Hornet edustaa neljättä sukupolvea ja saavuttaa elinkaarensa lopun 2020-luvun lopussa, joten seuraajasta on lähivuosina tehtävä päätös. On siis mahdollista, että seuraajaksi hankitaan jokin viidennen sukupolven hävittäjä häiveteknologialla varustettuna.</p> <p>Viidennen sukupolven hävittäjiä kehitellään ainakin Yhdysvalloissa, Venäjällä, Kiinassa, Intiassa ja Japanissa, mutta tässä tutkielmassa on vertailtu vain Yhdysvaltojen, Venäjän ja Kiinan viidennen sukupolven hävittäjiä. Yhdysvalloilla on tällä hetkellä ainut operaatiokäytössä oleva viidennen sukupolven hävittäjä, Lockheed Martin F-22 Raptor. Raptorin lisäksi Yhdysvalloilla on kehitysvaiheessa oleva Lockheed Martin F-35 Lightning II. Venäjällä on myös kehitysvaiheessa oleva Suhoi PAK FA samoin kuin Kiinalla on Chengdu J-20. Nämä kolme kehitysvaiheessa olevaa viidennen sukupolven hävittäjää on tarkoitus ottaa palveluskäyttöön ennen 2020-lukua.</p> <p>Tutkielman päätutkimuskysymys on, miten häiveteknologia toteutetaan viidennen sukupolven hävittäjissä. Lisäksi tutkielmassa on kaksi alakysymystä. Nämä ovat seuraavat: Miksi häiveteknologiaa tarvitaan? Miten häiveteknologian toteutus eroaa viidennen sukupolven hävittäjissä? Tutkimusmenetelmänä on käytetty kvalitatiivista kirjallisuustutkimusta ja vertailua julkisista lähteistä.</p> <p>Häiveteknologia ei ole mikään uusi innovaatio. Teknologiaa on kehitelty aina 1940-luvulta asti ja yksi tunnetuimmista häivepommikoneista, Lockheed Martinin F-117 Nighthawk, on jo poistunut palvelukäytöstä. Tuolloin häiveominaisuuksien ylläpito ja huolto aiheuttivat merkittäviä kustannuksia tutkasignaalia absorboivien maalien ja materiaalien takia. Viidennen sukupolven hävittäjissä on pyritty vähentämään näiden maalien ja materiaalien käyttöä, jotta käyttökustannukset saataisiin pienennettyä. On panostettu enemmän hävittäjien muodon antamaan suojaan tutkasignaalia vastaan maalien ja materiaalien sijaan. Tämä on nykyaikana mahdollista kehittyneiden tietokoneiden avulla, jotka pystyvät laskemaan optimaalisen muodon hävittäjälle sekä häive- että aerodynaamisten ominaisuuksien kannalta. Tutkasignaalia absorboivia maaleja ja materiaaleja on kuitenkin pakko käyttää erilaisten luokkujen ympärillä sekä muissa reunoissa, joissa muodolla ei saada riittävää vaikutusta.</p> |  |
| <b>AVAINSANAT</b><br><br>häivetekniikka, häiveteknologia, häivelentokone, viidennen sukupolven hävittäjä, hävittäjävertailu, Lockheed Martin, F-22 Raptor, F-35 Lightning II, Suhoi PAK FA, Chengdu J-20  |  |

# VIIDENNEN SUKUPOLVEN HÄVITTÄJIEN HÄIVETEKNOLOGIA

## SISÄLLYS

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>JOHDANTO</b> .....  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Tutkimuskysymykset ja rajaus .....   | 2         |
| 1.2      | Menetelmät ja lähdemateriaalin esittely .....                                | 3         |
| 1.3      | Käsitteet .....  | 3         |
| <b>2</b> | <b>HÄIVETEKNOLOGIAN TAUSTATEORIA</b> .....                                   | <b>7</b>  |
| 2.1      | Tutkan toimintaperiaate .....  | 7         |
| 2.2      | Häiveteknologia.....   | 9         |
| <b>3</b> | <b>HÄIVETEKNOLOGIAN TOTEUTUS VIIDENNEN SUKUPOLVEN<br/>HÄVITTÄJISSÄ</b> ..... | <b>14</b> |
| 3.1      | Lockheed Martin F-22 Raptor .....  | 14        |
| 3.2      | Lockheed Martin F-35 Lightning II .....                                      | 16        |
| 3.3      | Suhoi PAK FA .....   | 18        |
| 3.4      | Chengdu J-20.....  | 20        |
| 3.5      | Yhteenveto.....  | 22        |
| <b>4</b> | <b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....  | <b>24</b> |

## LÄHTEET

## LIITTEET

## **VIIDENNEN SUKUPOLVEN HÄVITTÄJIEN HÄIVETEKNOLOGIA**

### **1 JOHDANTO**

Häiveteknologiaa on käytetty lentokoneissa jo vuosikymmenien ajan. Sillä pyritään saamaan lentokoneen tutkajälki mahdollisimman pieneksi suunnittelemalla lentokone muun muassa tietyn muotoiseksi käyttäen tietynlaisia materiaaleja, maaleja ja rakenteita. Muodolla pyritään vaikuttamaan lentokoneen jättämään tutkajälkeen, mutta samalla pitäisi ajatella muodon vaikutusta aerodynaamisiin ominaisuuksiin. Materiaaleilla, maaleilla ja rakenteilla on taas paljon heikkouksia sekä taloudellisesti että käytettävyyden kannalta. Tästä syystä onkin häiveteknologiaa kehitellessä monella osa-alueella tehtävä kompromisseja. On mietittävä kuinka kannattava jokin ominaisuus on verrattuna siitä saatavaan hyötyyn.

Häiveteknologiaa on kehitelty aina 1940-luvun loppupuolelta saakka ja se on ollut alusta asti hyvin salaista. Lockheed Martin on ollut mukana kehityksessä 1950-luvun loppupuolelta asti, kun SR-71 Blackbird tiedustelukonetta alettiin kehittää [7, s. 4]. Tämän jälkeen on tullut useita häiveteknologialla varustettuja lentokoneita eri valmistajilta. Yksi tunnetuimmista on Lockheed Martinin valmistama pommikone F-117 Nighthawk, jota voidaan sanoa ensimmäiseksi operaatiokäytössä olleeksi häivekoneeksi [5, s. 214].

Ennen 2000-lukua ei operaatiokäytössä ole ollut hyvää liikehtimiskykyä omaavaa ja häiveteknologialla varustettua hävittäjää, sillä häiveteknologian vaatima muotoilu heikentää aerodynaamisia ominaisuuksia. Yleensä on tehtävä kompromissi aerodynaamisten ja häiveominaisuuksien osalta [10, s. 80]. Seuraavan sukupolven hävittäjiä ovat muun muassa Yhdysvalloissa jo operaatiokäytössä oleva F-22 Raptor ja kehitysvaiheessa oleva F-35 Lightning II sekä kehitysvaiheessa olevat Venäjän Suhoi PAK FA ja Kiinan Chengdu J-20. Yksi olennainen kehitys edellisistä sukupolvista on hävittäjien häiveteknologia, joka pienentää niiden tutkajälkeä huomattavasti jopa aseistettuna säilyttäen liikehtimiskyvyn mahdollisimman hyvin. Kaikki viidennen sukupolven hävittäjät ovat tällä hetkellä koelentovaiheissa ja niiden käyttöönotto tapahtuu lähivuosina, lukuun ottamatta Yhdysvaltojen F-22 Raptoria, joka otettiin palveluskäyttöön vuonna 2005 [1, s. 1].

Häiveteknologian tutkiminen on hyvin ajankohtaista, sillä sen käyttö kasvaa jatkuvasti sotateollisuudessa. Häiveteknologiaa käytetään lentokoneiden lisäksi myös muun muassa laivoissa ja ohjuksissa. Sotateknisen arvion ja ennusteen mukaan teknologisesti kehittyneimmästä hävittäjäkoneesta löytyvät vuonna 2020 kehittyneet häiveominaisuudet, eli stealth-kyky [9, s. 328]. Suomen ilmavoimien F/A-18 Hornet-hävittäjä edustaa neljättä sukupolvea, ja sen seuraajasta on tehtävä 2020-luvun alkupuolella päätös, kun se alkaa poistua palveluksesta vuodesta 2025 lähtien [17]. On siis mahdollista, että seuraajaksi hankitaan jokin viidennen sukupolven hävittäjä häiveteknologialla varustettuna.

Aikaisemmin häiveteknologiaa on käsitelty Maanpuolustuskorkeakoulussa muutamissa tutkielmissa, mutta parhaiten tätä käsitellään Samuli Niemen tutkimuksessa ”Stealth-teknologian merkitys ilmataistelussa 2000-luvulla” vuodelta 1998 sekä Fredrik Hahlin tutkimuksessa ”Häivemateriaalit ja -rakenteet lentokoneissa” vuodelta 2013. Molemmissa edellä mainituissa tutkimuksissa on käsitelty F-22 Raptorin häiveteknologiaa, mutta muista viidennen sukupolven hävittäjistä on vain muutamia mainintoja. Hahlin tutkimuksessa painopiste on ollut nimenomaan materiaaleissa sekä rakenteissa ja esimerkkinä on käytetty yhdessä luvussa F-117 Nighthawkin häiveteknologiaa ja ominaisuuksia.

## **1.1 Tutkimuskysymykset ja rajaus**

Tämän kandidaatintutkielman päämääränä on tutkia, millä tavoin häiveteknologiaa toteutetaan viidennen sukupolven hävittäjissä. Häiveteknologia käsittää melko laajan aiheen aina naamioinnista erilaisiin toimintatapoihin, joilla pyritään pysymään mahdollisimman huomaamattomina. Tässä työssä on tutkittu ainoastaan viidennen sukupolven hävittäjissä käytettyä tekniikkaa, jonka tarkoituksena on muokata tutkajälkeä mahdollisimman pieneksi. Painopisteenä on hävittäjien muotoilu sekä materiaalien käyttö. Tutkimuksessa on vertailtu keskenään F-22 Raptor, F-35 Lightning II, Suhoi PAK FA sekä Chengdu J-20 -hävittäjissä käytettyä häiveteknologiaa. F-22 Raptor sekä F-35 Lightning II edustavat länsimaisia hävittäjiä ja Suhoi PAK FA sekä Chengdu J-20 edustavat itämaisia. Jotta voidaan ymmärtää, miten hävittäjien muoto, materiaali ja kuormaus vaikuttavat tutkajälkeen, on myös käsiteltävä tutkan toimintaperiaatetta.

Vaikka viidennen sukupolven hävittäjiä kehitellään ainakin Yhdysvalloissa, Venäjällä, Japanissa, Kiinassa ja Intiassa, käsitellään tässä kandidaatintutkielmassa vain edellä mainittujen maiden hävittäjiä. Valinta on tehty siitä syystä, että näiden maiden kehittämät hävittäjät ovat olleet eniten julkisuudessa. Yhdysvalloilla on myös tällä hetkellä ainoa

operatiivisessa käytössä oleva viidennen sukupolven hävittäjä.

Päätutkimuskysymyksenä on:

- Miten häiveteknologia toteutetaan viidennen sukupolven hävittäjissä?

Päätutkimuskysymyksen lisäksi tutkielmassa on kaksi alakysymystä. Nämä ovat seuraavat:

- Miksi häiveteknologiaa tarvitaan?
- Miten häiveteknologian toteutus eroaa viidennen sukupolven hävittäjissä?

## 1.2 Menetelmät ja lähdemateriaalin esittely

Tässä kandidaatintutkielmassa on käytetty tutkimusmenetelmänä kvalitatiivista kirjallisuustutkimusta ja vertailua julkisista lähteistä. Lähdemateriaalin löytäminen on haastavaa, sillä kirjallisuutta ei vielä löydy kaikista tutkimuksessa olevista hävittäjistä. Kirjallisuutta löytyy ainakin Yhdysvaltojen hävittäjien osalta, mutta muiden maiden osalta on tukeuduttava internetlähteisiin ja lehtiartikkeleihin. Internetlähteisiin onkin suhtauduttava hyvin kriittisesti ja on pyrittävä vertailemaan mahdollisimman laajasti eri internetsivuja, jotta liioitelluilta ja vääriltä tiedoilta välttyttäisiin.

Koska viidennen sukupolven hävittäjät ovat operaatiokäytössä tai vasta kehitysvaiheessa, on käytössä oleva häiveteknologia osittain salaista tietoa. Haasteena tulee olemaan riittävän syvällisen tiedon hankkiminen julkisista lähteistä, jotta vertailu hävittäjien välillä olisi mahdollista.

## 1.3 Käsitteet

**Viidennen sukupolven hävittäjä** on hävittäjä, joka omaa tietynlaisia kehittyneitä ominaisuuksia ja järjestelmiä. Nämä ovat häiveominaisuudet, ylläänilentomahdollisuus ilman moottorin jälkipolttoa, suuntautuvat moottorin suihkusuuttimet, kehittyneet integroidut avioniikkajärjestelmät, soveltuvuus moniin erilaisiin tehtäviin sekä kehittyneet aktiiviset ja passiiviset sensorit. F-35 Lightning II lasketaan viidennen sukupolven hävittäjäksi, vaikka se ei omaa kaikkia näitä ominaisuuksia. [9, s. 328; 16]

**Häiveteknologia** tulee englannin kielestä sanasta ”stealth”. Suoraan käännettynä ”stealth” tarkoittaa suomeksi salamyhkäisyyttä. Häiveteknologia käsittää todella laajan aiheen aina naamioinnista erilaisiin toimintatapoihin joilla pyritään pysymään mahdollisimman

huomaamattomina. Häiveteknologia on osa elektronista sodankäyntiä. [10, s. 79].

**Radar Cross Section (RCS)** tarkoittaa lentokoneen tutkapoikkipinta-alaa neliömetreinä ( $m^2$ ) tai desibelinelioömetreinä ( $dBm^2$ ) ja merkitään symbolilla sigma ( $\sigma$ ). Desibeli-yksikkö helpottaa laskujen tekemistä todella suurilla tai pienillä tutkapoikkipinta-aloilla koska se perustuu logaritmfunktioon. Referenssi luku on  $1 m^2$ , joka tarkoittaa että tutkapoikkipinta-ala  $1 m^2$  vastaa  $0 dBm^2$ . Tutkapoikkipinta-alan voi muuttaa desibeleiksi seuraavalla kaavalla:

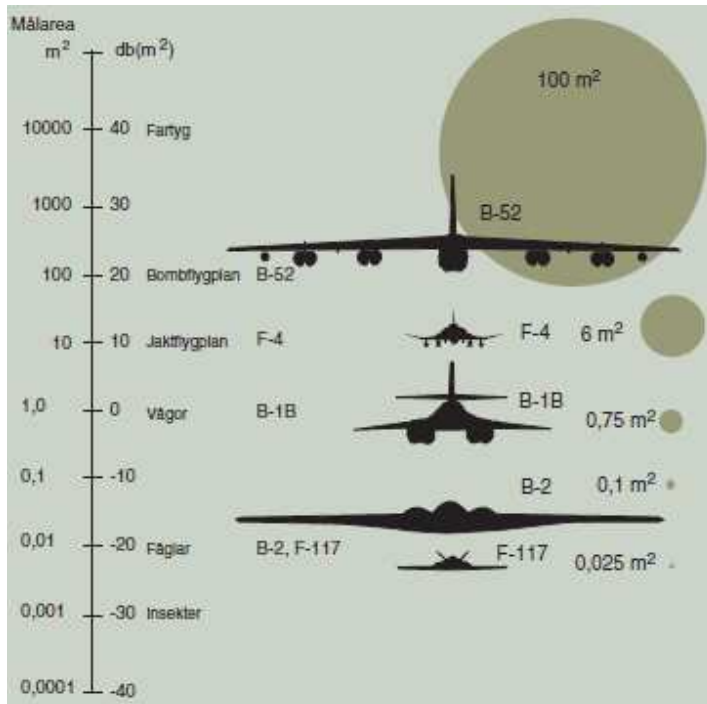
$$(1) \sigma_{dBm^2} = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma}{\sigma_R} \right)$$

Kaavassa (1)  $\sigma_R$  on  $1 m^2$  ja  $\sigma$  on tutkapoikkipinta-ala neliömetreissä.

Lentokoneen tutkapoikkipinta-ala ei ole sama asia kuin lentokoneen pinta-ala, vaan tämä mitta kuvaa lentokoneen havaittavuutta tutkalla. Tutkapoikkipinta-alaan vaikuttaa lentokoneen asento, muoto, materiaali sekä radioaallon polarisaatio ja taajuus. Tutkapoikkipinta-ala voidaan määritellä seuraavasti:

$$(2) \text{Tutkapoikkipinta-ala} = \text{kohteen projektiopinta-ala} * \text{heijastavuus} * \text{suuntaavuus}$$

Kaavassa (2) kohteen projektiopinta-ala on pinta ala, joka näkyy tutkan katsomasta suunnasta. Heijastavuus on kohteesta sironneen signaalin teho suhteessa maaliin osuneeseen signaalin tehoon. Sironneen signaalin teho on aina pienempi kuin kohteeseen osuneen signaalin teho, sillä kohde absorboi osan signaalista. Suuntaavuus tarkoittaa tutkan suuntaan sironneen signaalin tehoa suhteessa kohteesta sironneen tehon keskiarvoon. [10, s. 61–62, 68; 3, s. 41–42] Alla olevasta kuvasta (kuva 1) näkee muutamien koneiden tutkapoikkipinta-alat edestäpäin. Huomioitavaa on, että alimmaisiet lentokoneet (B-2 ja F-117) ovat häiveteknologialla varustettuja.



Kuva 1. Muutamien lentokoneiden tutkapoikkipinta-alat [18, s. 190]

Viidennen sukupolven hävittäjissä tutkapoikkipinta-alat ovat alle  $0,01 \text{ m}^2$  ( $-20 \text{ dBm}^2$ ), joka vastaa keskikokoista lintua. Vastaavasti  $400 \text{ m}^2$  tutkapoikkipinta-ala vastaa suurta taloa. Edellä olevassa kuvassa (kuva 1) on huomioitava, että tutkapoikkipinta-alat esitetään vain edestäpäin. Koska tutkapoikkipinta-ala on riippuvainen lentokoneen asennosta, voi tutkapoikkipinta-ala olla muista suunnista huomattavasti suurempi.

Häivelentokoneet voidaan jaotella tutkapoikkipinta-alan mukaan kahteen ryhmään. Nämä ovat Low Observables (LO) sekä Very Low Observables (VLO). LO-ryhmän lentokoneilla on tutkapoikkipinta-ala  $0,1\text{-}0,001 \text{ m}^2$  ( $-10\text{...}-30 \text{ dBm}^2$ ) ja VLO-ryhmän lentokoneilla  $0,001\text{-}0,0001 \text{ m}^2$  ( $-30\text{...}-40 \text{ dBm}^2$ ). Suurempi tutkapoikkipinta-ala kuin  $0,1 \text{ m}^2$  ( $-10 \text{ dBm}^2$ ) vastaa tavanomaista lentokonetta. [16; 22, s. 34–35]

**Radioaalto** on elektromagneettinen aalto, joka liikkuu valon nopeudella, eli tyhjiössä  $299\,792\,458 \text{ m/s}$  tai noin  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Koska se on aalto, sillä on myös taajuus ja aallonpituus. Nämä voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$(3) c = f * \lambda$$

Kaavassa (3)  $c$  = valon nopeus (m/s),  $f$  = taajuus (Hz) ja  $\lambda$  = aallonpituus (m). Mitä suurempi taajuus radioaallolla on, sitä pienempi aallonpituus. Tutkalla taajuus ja aallonpituus valitaan sen käyttötarkoituksen mukaan. Eri taajuuksilla on eri aallonpituudet, jolloin niillä on myös



erilaisia ominaisuuksia. [2, s. 1.1–1.2, 8.1]

**Tutkasignaalin absorboimisella** tarkoitetaan heijastussignaalin heikentämistä muuttamalla tutkasignaalin energian lämmöksi tai vaiheen muuttamista tutkapoikkipinta-alan pienentämiseksi. Tutkasignaalia absorboivia materiaaleja kutsutaan nimellä Radar Absorbing Material, lyhennettynä RAM ja tutkasignaalia absorboivia maaleja kutsutaan nimellä Radar Absorbing Paint, lyhennettynä RAP. Jos tutkasignaalia absorboivat materiaalit ovat osaa ilma-aluksen kantavia rakenteita, on kyse tutkasignaalia absorboivista rakenteista. Näitä rakenteita kutsutaan nimellä Radar Absorbent Structure, lyhennettynä RAS. [3, s. 51–56; 10, s. 81–82]

## 2 HÄIVETEKNOLOGIAN TAUSTATEORIA

Häiveteknologian tarpeen ymmärtämiseksi, on ensin perehdyttävä tutkan toimintaperiaatteeseen ja häiveteknologian toteutuksen perusteisiin, sillä häiveteknologialla voidaan pienentää ilma-aluksen näkyvyyttä tutkalla. Muotoilemalla ilma-alus tietyn muotoiseksi käyttäen samalla tutkasignaalia absorboivia materiaaleja ja maaleja, voidaan vaikuttaa tutkasignaalin käyttäytymiseen sen osuessa kohteeseen.

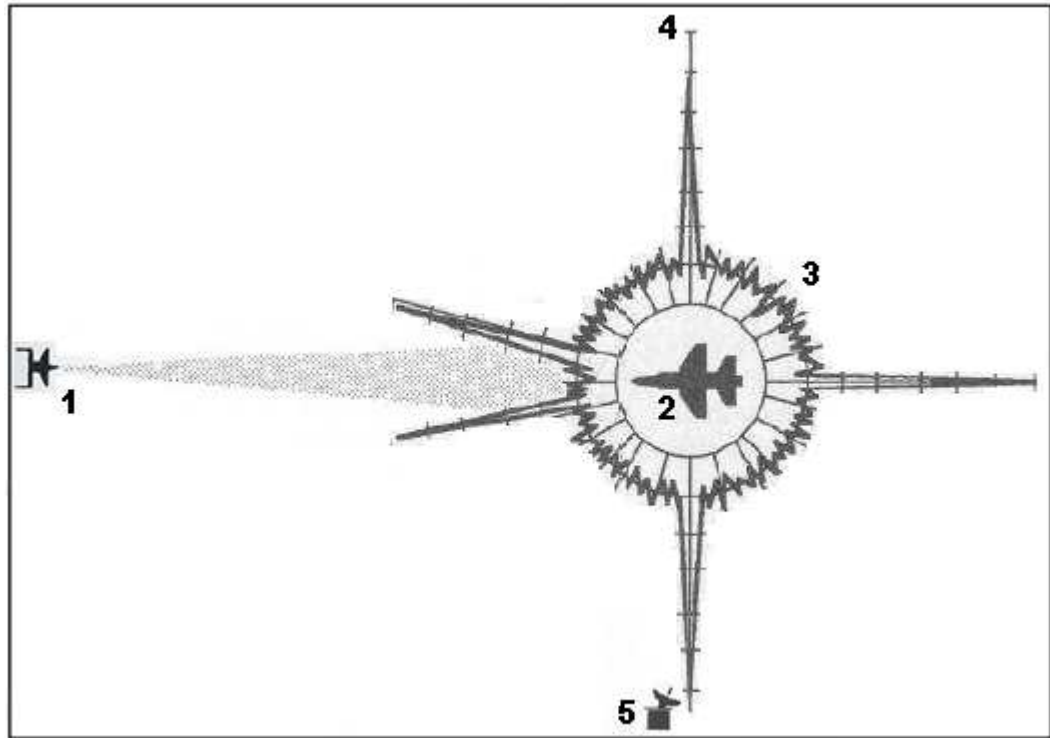
Tutkia on olemassa monenlaisiin eri käyttötarkoituksiin ja ne toimivat monilla eri taajuuksilla. Eri taajuudet käyttäytyvät eri tavalla, joten tätä vastaan ilma-alusten kehittäjät joutuvat keksimään ratkaisuja, jotta häiveominaisuudet olisivat mahdollisimman hyvät laajalla taajuusalueella. Kaikkia eri tutkatyyppejä vastaan ei kuitenkaan voida saada yhtä hyviä tuloksia, joten on myös mietittävä millaisia tutkia todennäköisesti olisi ilma-alusta vastassa.

### 2.1 Tutkan toimintaperiaate

Sana ”tutka” tulee englanninkielen sanoista ”radio detection and ranging”, eli lyhennettynä ”radar”. Kyse on siis radioaalloilla suoritettavasta havaitsemisesta. Kaikessa yksinkertaisuudessa tutka toimii siten, että antenni lähettää kapean keilamaisen radiosignaalin, joka osuu kohteeseen. Kohteessa radiosignaali siroaa eri suuntiin ja pieni osa sironnasta palaa takaisin vastaanottimelle. Kaikusignaalin ajan sekä antennin suunnan perusteella tutka pystyy paikantamaan kohteen ja Dopplerin ilmiön aiheuttaman taajuusmuutoksen avulla voidaan selvittää kohteen nopeus. 3D-tutka kykenee havaitsemaan kohteen sekä sivuttais- että korkeussuunnassa, kun taas 2D-tutka havaitsee kohteen vain sivusuunnassa. Jos tutka lähettää radiosignaalia jatkuvasti, on kyse CW-tutkasta (Continuous Wave). Pulssitutka puolestaan lähettää lyhyen ajan radiosignaalia ja jää odottamaan tietyn ajan kaikua ennen kuin lähettää radiosignaali-pulssin uudestaan. Jos tietää pulssitutkan jakson pituuden, voi tutkan teoreettisen maksimi- ja minimikantaman laskea. [10, s. 9, 15–16]

Alla olevassa kuvassa (kuva 2) on yksinkertaistettuna tutkan toimintaperiaate. Tutka (1) lähettää tutkapulssin, josta osa osuu kohteeseen (2). Kohteesta tutkasignaali siroaa joka suuntaan (3), mutta sironta aiheuttaa vain muutaman helposti havaittavan piikin (4). Häiveteknologialla pyritään vähentämään ja poistamaan näitä piikkejä tai ainakin lähettämään piikit pois päin vastaanottimelta. Tätä toimintaa hankaloittaa häiveteknologian kannalta kaksipaikkatutkat, eli bi-staattiset tutkat, tai monipaikkatutkat, eli multistaattiset tutkat. Näissä

tutkissa lähettimet ja vastaanottimet ovat eri paikoissa (5), jolloin kohteen heijastamia piikkejä on hallittava joka suuntaan. [10, s. 17–18; 21, s. 35]



Kuva 2. Tutkan toimintaperiaate [21, s. 35]

Tutkan kantamaan vaikuttavat useat eri tekijät eikä niitä kaikkia ole tässä tarkoituksenmukaista huomioida. Seuraavasta kaavasta voidaan kuitenkin laskea pulssitutkan maksimikantama ideaaliolosuhteissa tyhjiössä:

$$(4) R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot t_p \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot SNR_{min} \cdot k \cdot T_{ekv} \cdot L}}$$

Kaavassa (4)  $R_{max}$  = tutkan maksimikantama (m),  $P_s$  = tutkan lähetysteho (W),  $t_p$  = pulssijakson pituus (s),  $G$  = antennin vahvistus (kerroin),  $\lambda$  = aallonpituus (m),  $\sigma$  = tutkapaikkipinta-ala ( $m^2$ ),  $SNR_{min}$  = pienin signaali-kohinasuhde signaalin havaitsemiseksi (kerroin),  $k$  = Boltzmannin vakio  $1,38 \cdot 10^{-23}$  (J/K),  $T_{ekv}$  = ekvivalenttinen kohinalämpötila (K) sekä  $L$  = häviö (kerroin). Suluissa on esitetty kyseisen symbolin yksikkö. Kaavasta (4) voidaan saada arvoja esimerkiksi siitä, kuinka paljon eri tekijöitä on suurennettava tai pienennettävä, jotta tutkan kantama saataisiin riittäväksi. Jos haluaa kaksinkertaistaa tutkan kantaman, on lähetystehoa suurennettava tai pulssin jaksoa pidennettävä kertoimella 16. Huomioitavaa on, että ilmakehän sääilmiöt ja olosuhteet vaimentavat tutkasignaalia huomattavasti. Tähän ilmiöön vaikuttaa eniten tutkasignaalin aallonpituus. Mitä pidempi aallonpituus, sitä pienempi on vaimennus. Saadakseen pitemmän kantaman, on valittava mahdollisimman pieni taajuus

(pidempi aallonpituus), jotta lähetysteho ei kasvaisi liian suureksi. Pienellä taajuudella tutkan erottelukyky ja mittaustarkkuus kuitenkin kärsivät. [10, s. 20, 35–41; 18, s. 47–49]

Ilmailussa tutkaa käytetäänkin monessa eri yhteydessä. Lennonjohtajat käyttävät tutkaa ohjatessaan ilmatilassa lentäviä lentokoneita ja lentokoneissa on lennonjohtajien kanssa kommunikoiva toisiotutka. Säättutka on jo vakiovaruste melkein kaikissa uusimmissa matkustajakoneissa ja sotilaskoneissa voi olla yksi tai useampia vihollisen havaitsemiseen tarkoitettuja tutkia. Nämä kaikki tutkat toimivat eri taajuuksilla ja tehoilla, jolloin ne soveltuvat parhaiten omaan käyttötarkoitukseensa. Taajuusvalinnalla pyritään toteuttamaan viittä eri vaatimusta. Nämä ovat häiriöiden ja ilmakehän vaimennuksien minimoiminen, etäisyys, lyhyt aallonpituus kapeaa keilaa varten sekä kohteen koon mukaan sopiva aallonpituus. Siviilissä tutkien taajuudet ovat UHF (Ultra High Frequency) tai SHF (Super High Frequency) luokkaa, joka tarkoittaa taajuutta 300 MHz – 3 GHz ja aallonpituutta 1 m – 1 cm. Sotilastutkat voivat toimia jopa EHF (Extremely High Frequency) alueella, joka taas tarkoittaa taajuuksia 30 GHz – 300 GHz ja aallonpituuksia 1 cm – 1 mm. Taajuudet voidaan myös jakaa kirjaimilla IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) mukaan. Tärkeimmät näistä kirjaimista ovat L (1-2 GHz), S (2-4 GHz), C (4-8 GHz) sekä X (8-12 GHz). Kuten aiemmin mainittu, aallonpituus vaikuttaa ilmakehän vaimennukseen, joten sama pätee taajuuksilla. Mitä korkeampi taajuus, sitä enemmän signaali vaimentuu maapallon ilmakehässä. Tämä tarkoittaa sitä, että korkeilla taajuuksilla on lähetysteho oltava suurempi, jotta saataisiin sama kantama kuin pienemmillä taajuuksilla. [2, s. 1.3, 8.3; 10, s. 19]

## 2.2 Häiveteknologia

Häiveteknologialla pyritään pienentämään ilma-aluksen tutkapaikkipinta-alaa erilaisilla keinoilla. Kun ilma-aluksen tutkapaikkipinta-ala pienenee riittävästi, pienenee myös tutkan havaitsemisetäisyys. Aiemmin esitetystä tutkakaavasta (4) huomaa, että tutkapaikkipinta-alaa on pienennettävä noin 95 %, jotta havaitsemisetäisyys putoaisi puoleen [18, s. 186]. Vastaavasti havaitsemisetäisyys putoaa noin 95 %:iin, kun tutkapaikkipinta-ala pienenee 1/100000:aan. Koska tutkakaavasta (4) on ainoastaan mahdollista muuttaa tutkapaikkipinta-alaa häiveominaisuuksilla varustetussa lentokoneessa, voidaan seuraavasta taulukosta (taulukko 1) nähdä, miten tutkapaikkipinta-ala vaikuttaa tutkan havaitsemisetäisyyteen tutkakaavan mukaan [3, s. 38]. Taulukossa on oletettu havaitsemisetäisyyden olevan 100 km kun tutkapaikkipinta-ala on 10 m<sup>2</sup>.

Taulukko 1. Tutkapoikkipinta-alan vaikutus tutkan havaitsemisetaisyteen.

| RCS (m <sup>2</sup> ) | Tutkan havaitsemisetaisyys (km) | Muutos verrattuna 1000 m <sup>2</sup> (%) |
|-----------------------|---------------------------------|---|
| 1000                  | 316,23                          | -   |
| 100                   | 177,83                          | 43,77                                     |
| 62,5                  | 158,11                          | <b>50,00</b>                              |
| <b>10</b>             | <b>100</b>                      | 68,38                                     |
| 1                     | 56,23                           | 82,22                                     |
| 0,1                   | 31,62                           | 90,00                                     |
| 0,01                  | 17,78                           | <b>94,38</b>                              |

Tutkapoikkipinta-alan pienentämiseen on huomioitava lukuisia eri tekijöitä, joista tärkeimmät ovat ilma-aluksen muotoilu ja siinä käytettävät materiaalit. Koska ilma-alus havaitaan tutkalla siitä heijastuneen signaalin avulla, on signaaliin pyrittävä vaikuttamaan jollain tavalla. Tämä toteutetaan joko heijastamalla signaalia poispäin tutkan vastaanottimelta, muuttamalla signaalin vaihetta 180° tai absorboimalla signaali. Nämä menetelmät estävät tai ainakin heikentävät tutkan vastaanottimen kykyä havaita ilma-alus. Näillä menetelmillä ei kuitenkaan voida saada tutkapoikkipinta-alaa joka suuntaan yhtä pieneksi, vaan eri puolelta ilma-alusta tutkan signaali heijastuu eri tavalla. [10, s. 79]

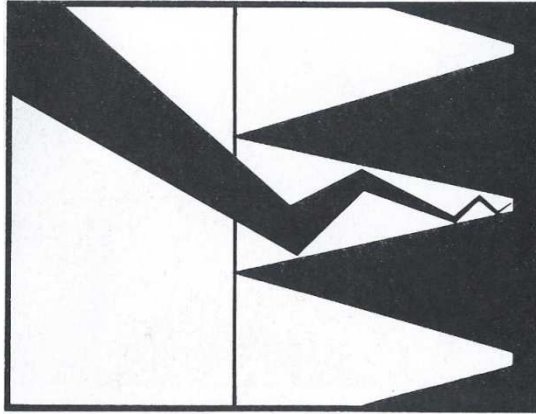
Tarkoitus ei kuitenkaan ole tehdä hävittäjää kokonaan näkymättömäksi vihollisen tutkalla, sillä se olisi erittäin kallista ja vaikeaa. Vihollinen tarvitsee aikaa analysoidakseen hyökkäystä, jotta pystyisi puolustautumaan sitä vastaan. Häiveominaisuuksien kannalta riittää, jos ilma-alus havaitaan riittävän myöhään, jotta puolustustoimia ei yksinkertaisesti ehditä tekemään. Vertailuna voidaan käyttää eläimien maastoutumista luonnossa. Jos havaitset tiikerin vasta kun se on kymmenen metrin päässä sinusta, on todennäköisesti jo liian myöhäistä ryhtyä minkäänlaisiin toimenpiteisiin. Tästä syystä ilma-aluksen häiveominaisuudet edestapain ovat kaikkein tärkeimpiä, sillä hyökkäyksessä kohde pyrkii havaitsemaan lähestyvää ilma-alusta etusektorista. [20, s. 35–36; 19]

Muoto vaikuttaa hyvin paljon ilma-aluksen aerodynaamisiin ominaisuuksiin, joten on tehtävä kompromissi aerodynaamisten ja häiveominaisuuksien väliltä. Kohdat, jotka heijastavat tutkasignaalia parhaiten, ovat kohtisuorat levyt sekä sylinterimäiset rakenteet. Kohtisuorilla levyillä voidaan kuitenkin samalla hallita tutkasignaalin heijastusta asettamalla ne sellaiseen kulmaan, että signaali heijastuu poispäin vastaanottimelta. Kun tämän lisäksi muotoillaan ilma-alus siten, että mahdollisimman monet pinnat ovat samassa kulmassa, saadaan sirontapiikit

suunnattua samaan suuntaan. Tällöin hävittäjä aiheuttaa muutamia suuria sirontapiikkejä monen pienen sijaan, jolloin havaitsemismahdollisuus pienenee. Näiden sirontapiikkien takia hävittäjä ei ole kaikista suunnista yhtä hyvin suojattu tutkasignaaleilta. Jostain suunnasta hävittäjän häiveominaisuudet voivat olla VLO-luokkaa, kun taas toisesta suunnasta LO-luokkaa tai vielä huonompaa. Tärkein suunta on kuitenkin hävittäjän etusektorista tuleva tutkasignaali. [22, s. 113–117]

Sylinterimäiset rakenteet ovat hävittäjässä esimerkiksi antennit sekä ulkoiset kuormat, kuten ohjukset ja lisäpolttoainesäiliöt. Tästä syystä nämä ovat viidennen sukupolven hävittäjissä sijoitettu luukkujen sisäpuolelle. Koska ulkoista kuormaa ei kannata ripustaa siipiin tai runkoon häiveominaisuuksien kannalta, on lentokoneen rungosta tehtävä huomattavasti isompi, jotta rungon sisälle saisi mahtumaan riittävästi asekuormaa ja polttoainetta. Asekuormaa laukaistessa luukut on kuitenkin avattava, jolloin hävittäjä on haavoittuva liikehtelykyvyn heikkenemisen ja tutkapaikkipinta-alan kasvamisen takia. On siis pyrittävä pitämään aselokeroiden luukut mahdollisimman lyhyen aikaa auki. Lentokoneen koon aiheuttama lisäpaino ja ilmanvastus on kannettava aina mukana, eikä sitä voi pudottaa pois kuten lisäsäiliöillä voi tehdä. Lisäpaino ja ilmanvastus aiheuttavat taas lisävaatimuksia moottoreille työntövoiman muodossa. [4; 10, s. 80–81]

Kun häiveominaisuuksia ei enää saada muodolla pienennettyä tarpeeksi tai muotoa ei voida syystä tai toisesta muuttaa, voidaan häiveominaisuuksia parantaa erilaisilla materiaaleilla, maaleilla tai rakenteilla jotka absorboivat tutkasignaalia. Ilma-aluksissa nämä materiaalit aiheuttavat ongelmia, sillä ne lisäävät painoa eivätkä välttämättä kestä lennettäessä ilmeneviä rasituksia. Eri materiaalit ja maalit soveltuvat myös eri tutkataajuuksille, joten absorboivat materiaalit ja maalit on valittava sopivaa taajuutta vastaan. Materiaalien paksuus vaikuttaa myös merkittävästi heijastavuuteen eri tutkataajuuksilla. Mitä pienempi taajuus, sitä paksumpi on absorboivan materiaalin oltava. Tutkasignaalia absorboivia rakenteita käytetään usein luukkujen ympärillä. Lisäksi luukkujen reunat muotoillaan sahalaitaisiksi, jolloin tutkasignaalin osuessa, se kimpoaa edestakaisin V-muodon sisällä heikentyen absorboivien materiaalien avulla (kuva 3). [3, s. 56; 10, s. 81–82]



Kuva 3. Tutkasignaalia absorboivan sahalaitarakenteen toimintaperiaate [21, s. 48]

Ohjaamon kuomu on suuri ongelmakohta häiveominaisuuksien kannalta, sillä hävittäjän ohjaajan on nähtävä ongelmitta kuomun läpi ulos, mutta tutkasignaalit eivät saa heijastua kuomusta eivätkä kuomun sisäpuolella olevista muodoista takaisin vastaanottimelle. Tämän lisäksi kuomun on suojattava ohjaajaa muiden koneiden sekä auringon aiheuttamalta elektromagneettiselta säteilyltä. Kuomuissa käytetäänkin lukusia pinnoitteita eri materiaaleista, jotka antavat kuomulle tarvittavat ominaisuudet. [6 s. 6; 19]

Moottori kasvattaa tutkapaikkipinta-alaa huomattavasti. Hyvin suunniteltu moottorin ilmanottoaukko suorituskyvyn näkökulmasta, on huono taas häiveominaisuuksiltaan. Tässä on jälleen pystyttävä tekemään kompromissi molempien kannalta. Suora ja lyhyt ilmanottoaukko olisi suorituskyvyltä paras vaihtoehto, mutta tutkasignaali heijastuu todella hyvin kohtisuorista pinnoista. Suorassa ilmanottoaukossa tutkasignaali kulkisi helposti moottoriin, jossa se heijastuisi kohtisuorista pyörivistä metallilavoista ahtimessa. Moottorin ahtimen osat ovatkin lentokoneessa kaikkein suurin vaikuttava tekijä tutkapaikkipinta-alaan. Tästä syystä moottori on suunniteltava siten, että ilmanottoaukot kaartuvat hieman eikä suoraa näköyhteyttä ole edestäpäin ahtimen osiin. Tämän lisäksi ilmanottoaukoissa käytetään usein tutkasignaalia absorboivia materiaaleja, jotta ilmanottoaukossa kimpoileva tutkasäde vaimentuu jokaisella kosketuksella. Tällöin tutkasignaalin energia ei riitä palaamaan vastaanottimelle. [21, s. 42–43; 6, s. 6]

Kehittyneellä tutkalla voi JEM-tekniikalla (Jet Engine Modulation) tunnistaa lentokoneen ahtimen aiheuttamasta yksilöllisestä kaiusta, joka riippuu lapojen lukumäärästä ja kierrosnopeudesta. Ongelman voi ratkaista asettamalla ilmanottoaukot rungon yläpuolelle, kuten on tehty esimerkiksi Northrop Grummanin B-2 Spirit pommikoneessa. Tämä estää maasta tai alhaaltapäin tulevan tutkasignaalin heijastumisen moottorista. Viidennen sukupolven hävittäjiin tämä ei ole toimiva ratkaisu sillä niitä vastaan uhka voi tulla mistä suunnasta tahansa. Ilmanottoaukkojen asettaminen rungon yläpuolelle ei suojaa ylhäältäpäin tulevalta

tutkasäteeltä. Samoin F-117 Nighthawkissa käytetty ilmanottoaukon edessä oleva ristikko tutkasignaalin estämiseksi ei ole toimiva ratkaisu viidennen sukupolven hävittäjissä. Yli yhden Machin nopeuksilla ristikko aiheuttaisi paineaaltoja, jotka tukehduttaisivat moottorin ilmansaannin. [22, s. 115–116]



### 3 HÄIVETEKNOLOGIAN TOTEUTUS VIIDENNEN SUKUPOLVEN HÄVITTÄJISSÄ

Pelkästään kuvia katsomalla huomaa, että viidennen sukupolven hävittäjissä on paljon yhtäläisyyksiä muotoilussa. Muotoiluun onkin panostettu enemmän viidennen sukupolven hävittäjissä edeltäjiinsä verrattuna. Nykyaikaisilla kehittyneillä tietokoneilla on voitu valmistaa paremmin muotoiltuja häivelentokoneita, jolloin tutkasignaalia absorboivien materiaalien ja maalien käyttöä on voitu vähentää. Aikaisemmissa häivelentokoneissa nämä materiaalit ja maalit ovat aiheuttaneet ongelmia varsinkin huoltojen yhteydessä.

Julkisuuteen on vuotanut lukuisia kirjoituksia, joissa syytetään puolien ja toisin häivetekniikan varastelusta. Vaikka yhtäläisyyksiä on paljon, löytyy kuitenkin myös paljon eroavaisuuksia, kun perehtyy kuvia syvemmälle. Huomioitavaa on kuitenkin se, että näin uusilla hävittäjillä on hyvin salaista teknologiaa käytössä, joten kaikkia yksityiskohtia ei löydy julkisista lähteistä.

#### 3.1 Lockheed Martin F-22 Raptor



Kuva 4. Lockheed Martin F-22 Raptor [15]

Yli kahdenkymmenen vuoden kehitystyö ATF-ohjelmassa (Advanced Tactical Fighter) tuotti Yhdysvalloille ensimmäisen viidennen sukupolven hävittäjän Lockheed Martin F-22 Raptor. Hävittäjä astui palvelukseen vuonna 2005 ja on tällä hetkellä ainut palveluksessa oleva viidennen sukupolven hävittäjä. F-22 Raptorin häivetekniikka on kehitelty jo palveluksesta poistuneesta F-117 Nighthawkista, mutta nykyajan tietokoneiden avulla on voitu luottaa enemmän muodon antamiin häiveominaisuuksiin materiaalien sijasta. Tästä syystä F-22

Raptorin ylläpito- ja huoltokustannukset on saatu alemmas aikaisempiin häivelentokoneisiin verrattuna. [1, s. 1; 20, s. 87]

Jotta huoltokustannukset pysyisivät kurissa, on komponentteihin päästävä helposti käsiksi ilman että häiveominaisuudet kärsivät. Tutkasignaalia absorboivia materiaaleja tulisi myös olla mahdollisimman vähän, sillä niiden ylläpito on kallista. F-22 Raptorin onkin asennettu huoltoluukkuja, jotka ovat varustettu erikoisilla tiivisteillä ja lukoilla häiveominaisuuksien säilyttämiseksi ja tutkasignaalia absorboivia materiaaleja on käytetty vain noin kolmasosa siitä mitä häivelentokoneet ovat käyttäneet aikaisemmin. Koko runko on käsitelty metallipeitteellä, jotta tutkasignaali ei pääsisi läpäisemään hävittäjän komposiittirakenteita. [20, s. 98; 3, s. 81]

F-22 Raptorin runko on perinteistä hävittäjää suurempi, jotta ulkoista kuormaa ei tarvitse kantaa. Kaikki aseistus on asetettu luukkujen taakse runkoon ja polttoainesäiliöt rungossa sekä siivissä ovat riittävän isot takaamaan tarvittavan toimintasäteen. Tämä mahdollistaa häiveominaisuuksien säilymisen. Rungon alapuolella olevien luukkujen taakse mahtuu kuusi AIM-120C AMRAAM tutkahakeutuvaa ohjusta ja rungon molemmilla sivuilla olevien luukkujen taakse mahtuu kumpaankin yksi AIM-9 Sidewinder infrapunaohjus. AIM-9M-ohjus vaatii lukon kohteeseen ennen laukaisua, jolloin aselokeron luukku on pidettävä auki koko lukitsemisprosessin ajan aina laukaisuun saakka. Luukun ollessa auki F-22 Raptor on haavoittuva sekä suorituskyvyn että häiveominaisuuksien kannalta. Ongelma on kuitenkin korjattu AIM-9X Block II-ohjuksella, jolla on kyky suorittaa lukitusprosessi vasta laukaisun jälkeen. Tällöin aselokeroiden luukkuja on pidettävä auki vain ohjuksen laukaisun ajan ja haavoittuvuus aika lyhenee huomattavasti. Oikean siiven tyvestä löytyy General Dynamics M61A2 tykki, jonka piipun suu on myös peitetty luukulla häiveominaisuuksien säilyttämiseksi. Sekä laskutelineiden- että aselokeroiden luukuissa on käytetty sahalaitatekniikkaa parantamaan häiveominaisuuksia (liite 1, kuva 9). [4; 20, s. 97–98]

Kuvia katsomalla näkee parhaiten, miten F-22 Raptor hävittäjässä on toteutettu muotoilu. Edestäpäin katsottuna (kuva 4) näkee ilmanottoaukkojen muotoilun sekä rungon sivujen ja sivuvakaajien saman kulman. Myös hävittäjän nokka on muotoiltu häiveominaisuuksia ajatellen. Nokka ei ole sylinterimuotoinen, vaan on pyritty käyttämään suoraa ja kulmikkaita muotoja. Ylhäältäpäin katsottuna (kuva 8) löytyy huomattavasti enemmän pintoja, jotka viittaavat häiveominaisuuksiin. Ilmanottoaukkojen, siipien ja korkeusvakaajien johtoreunat ovat kaikki samassa kulmassa keskenään. Sama koskee myös siipien ja korkeusvakaajien jättöreunoja. Siipien ja rungon liittymäkohdat ovat tasaisia ja teräviä aivan kuten rungon pohjakin. [15; 14]

Ilmanottoaukot ovat suunniteltu F-22 Raptorissa siten, että aukkojen huulet ovat kolmessa eri kulmassa, jotta häive- ja ylääänilentö-ominaisuudet olisivat parhaat mahdolliset. Tämä rakenne on kuitenkin melko painava ja monimutkainen, sillä se aiheuttaa turbulenttista rajakerrosta rungon sivuille, mikä pitää eliminoida. Ongelma on ratkaistu ilmanottoaukon ja rungon välisellä pienellä raolla, joka poistaa turbulenttiset ilmanvirtaukset. Ilmanottoaukot kaartuvat sekä pysty, että vaakasuunnassa, jotta ahtimen osiin ei olisi suoraa näköyhteyttä. [22, s. 116; 3, s. 81]

F-22 Raptorin moottoreina on kaksi Pratt & Whitney F119 suihkumoottoria, joissa on neliskulmaiset kahdessa tasossa suuntautuvat suihkusuuttimet. Neliskulmaisissa suuttimissa on paremmat häiveominaisuudet kuin pyöreissä. Tämän lisäksi häiveominaisuuksia on paranneltu asentamalla suuttimien ympärille sahalaitaista tutkasignaalia absorboivaa materiaalia ja suuttimien väliin häivemuotoiltu puomi (liite 1, kuva 9). [22, s. 103]

### 3.2 Lockheed Martin F-35 Lightning II



Kuva 5. Lockheed Martin F-35 Lightning II [11]

Lockheed Martinin F-35 Lightning II on tulos JSF-ohjelmasta (Joint Strike Fighter), johon on osallistunut Yhdysvaltojen lisäksi Yhdistyneet Kuningaskunnat, Italia, Alankomaat, Australia, Kanada, Norja, Tanska ja Turkki. Hävittäjän häivetekniikka on peräisin F-22 Raptorista, minkä voi todeta koneiden samankaltaisesta ulkonäöstä. F-35-hävittäjässä on kuitenkin pyritty vielä kustannustehokkaampaan häivetekniikkaan muuttamalla suunnittelu- ja kehitysprosesseja sekä

materiaaleja halvemmiksi. Huomioitavaa on, että F-35 Lightning II on tämän vertailun pienin ja ainut yksimoottorinen hävittäjä. [11; 22, s 112]

Lentokoneen huoltoja varten, on huoltoluukkuja oltava ympäri konetta. Luukkuja ei millään voi suunnitella siten, että ne sulkeutuisivat täydellisesti jättämättä pienintäkään reunaa, josta tutkasignaali voisi havaita koneen. Tästä syystä F-35 Lightning II-hävittäjässä on huoltoluukkujen ympärille asennettu tutkasignaalia absorboivia materiaaleja ja maaleja. Näitä materiaaleja ja maaleja on myös käytetty koneen rungon, siipien, korkeus- ja sivuvakaajien reunoissa. Aselokeroiden luukkujen reunat ovat häivemateriaalien lisäksi muotoiltu sahalaitaisiksi. Laskutelineiden luukut sen sijaan eivät ole muotoiltu sahalaitaisiksi. Suurin osa koneen rakenteista on peitetty metallipeitteellä, joka estää tutkasignaalia läpäisemästä komposiittirakenteita, aivan kuten F-22 Raptorissa. [22, s. 105, s. 117–118]

Katsottaessa hävittäjää edestäpäin (kuva 5), voi muotoilusta todeta että mallina on käytetty F-22 Raptoria. Rungon sivut ovat samassa kulmassa kuin sivuvakaajat ja nokka ei ole sylinterin muotoinen. Tällä hallitaan tutkasignaalin sirontaa sivuille ja pienennetään lentokoneen tutkapaikkipinta-alaa. Ylhäältäpäin katsottuna (kuva 8) löytyy myös monia pintoja, jotka ovat samassa kulmassa, kuten esimerkiksi siipien ja korkeusvakaajien jättöreunat. F-35-hävittäjän pohjaa on muokattu epätasaiseksi (kuva 5), jotta sisäinen kuormatila saataisiin suuremmaksi. Tämä aiheuttaa pohjaan sylinterimäisiä muotoja, jotka ovat huonoja häiveominaisuuksien kannalta. Aiemmassa prototyypissä pohja oli tasainen (liite 1, kuva 10). Myös siipien ja rungon liittymäkohdat ovat muotoiltu epätasaisiksi, mikä vaikuttaa kielteisesti häiveominaisuuksiin sylinterimuotojensa ansiosta. [11; 14]

Moottorin ilmanottoaukot eivät ole F-35-hävittäjässä suorat, vaan ne kaartuvat estääkseen tutkan suoran näköyhteyden ahtimen pyöriin lapiihin. Ilmanottoaukot ovat vuorattu tutkasignaalia absorboivilla materiaaleilla ja muotoiltu siten, että tutkasignaalit kimpoilevat lukuisia kertoja ilmanottoaukon seinistä heikentyen jokaisella kosketuskerralla. Ilmanottoaukkojen huulissa ei ole F-22 Raptorin tapaan rakoja, vaan kuhmu rungon puolella, joka aiheuttaa pienen paineen nousun ja ohjaa turbulenttisen rajakerroksen sivuun. Tämä ratkaisu on kevyt, yksinkertainen ja omaa hyvät häiveominaisuudet, mutta ei suoriudu ylläänilentämisestä yhtä hyvin kuin F-22 Raptorin ratkaisu. [22, s. 112, s. 115–116]

F-35 Lightning II-hävittäjiin on asennettu Pratt & Whitney F135 moottori, joka on kehitetty F-22 Raptorin moottorista. Mallista riippuen moottorissa voi olla kääntyvä suihkusuutin. Konemalleissa, jossa on STOVL-kyky (Short Take-Off and Vertical Landing) ja kääntyvä

moottorin suihkusuutin, on oltava luukut moottorin alapuolella, jotta suutin pääsee kääntymään alaspäin. Tämä aiheuttaa ongelmia häiveominaisuuksien kannalta ja luukkujen onkin oltava todella vahvat ja luotettavat. Lyhyen lentoonlähdon jälkeen luukkujen on pystyttävä sulkeutumaan tiiviisti, jotta häiveominaisuudet säilyisivät. [22, s. 103–104]

F-35-hävittäjän moottorin suutinta kutsutaan nimellä LOAN (Low Observable Asymmetric Nozzle). Siinä on pienennetty infrapunasäteilyn aiheuttamaa jälkeä sekoittamalla moottorin ympärillä olevaa kylmää ilmaa moottorin suuttimesta tulevan lämpimän ilman kanssa, jotta suuttimen ilmanvirtauksen lämpötilaa saataisiin laskettua. Moottorin suuttimen tutkapoikkipinta-alaa on pienennetty käyttämällä tutkasignaalia absorboivia materiaaleja sekä muotoilemalla suuttimen pää sahalaitaiseksi. F-35 Lightning II-hävittäjän suuttimessa käytetty tekniikka on kevyempää ja halvempaa kuin F-22 Raptorissa käytettyä suuntautuvaa neliskulmaista suihkusuutinta, mutta häiveominaisuudet ovat heikommät pyöreän muotonsa ansiosta. [22, s. 115–116]

### 3.3 Suhoi PAK FA



Kuva 6. Suhoi PAK FA [13]

Venäläisten Suhoi PAK FA, prototyyppinimeltään T-50, on maailman ensimmäinen häiveominaisuuksilla (LO/VLO-ryhmä) varustettu miehitetty lentokone, joka on valmistettu Yhdysvaltojen ulkopuolella. Ensilento tällä hävittäjällä tehtiin vuoden 2010 alussa ja kehitystyö jatkuu edelleen. T-50 suunniteltiin alun perin kilpailemaan ilmataistelussa Yhdysvaltojen F-22 Raptoria vastaan sekä näköetäisyyden ulkopuolella (BVR, Beyond Visual

Range), että näköetäisyyden sisäpuolella (WVR, Within Visual Range). Suhoi PAK FA omaa paremman liikehtelykyvyn kuin F-22 Raptor, mutta häviää häiveominaisuuksissa. [16]

Suhoi PAK FA-hävittäjä on ulkonäöltään hieman erilainen kuin muut viidennen sukupolven hävittäjät. Moottorit näyttävät roikkuvan erikseen rungon alla, mikä tekee hävittäjästä matalamman ja leveämmän näköisen. Pintoja on kuitenkin asetettu häiveominaisuuksien edellyttämällä tavalla samoihin kulmiin. Ylhäältäpäin katsottuna (kuva 8) LEX:in (leading-edge extension), siipien ja korkeusvakaajien johtoreunat sekä siipien ja korkeusvakaajien jättöreunat ovat samassa kulmassa. Edestäpäin katsottuna (kuva 6) moottorien ilmanottoaukkojen ulkoreunat ovat samassa kulmassa kuin sivuvakaajat. Nokka on leveämpi ja litteämpi kuin vertailun muissa hävittäjissä, mutta se on kuitenkin muotoiltu häiveominaisuuksien edellyttämällä tavalla terävällä liittymäkohdalla ylä- ja alarungon välillä. [13; 14; 19]

Tutkapoikkipinta-alan kannalta ongelmana on moottorien sijoittelu ja muotoilu. Suhoi PAK FA-hävittäjässä on kaksi todella suorituskykyistä moottoria, joilla on pyöreät kolmessa tasossa suuntautuvat suihkusuuttimet (liite 1, kuva 12). Koska moottorit ikään kuin roikkuvat rungon alla erillisenä osana, tekevät ne rungon pohjasta todella epätasaisen (liite 1, kuva 11). Pohjassa olevat kuhmut ja sylinterimuodot sekä moottorin suihkusuuttimien pyöreä muoto heijastavat tutkasignaalia joka suuntaan. Myös siipien ja rungon liittymäkohdat ovat moottoreiden takia todella epätasaiset. Moottoreiden välissä oleva häivemuotoiltu puomi (liite 1, kuva 12) sisältää tutkan, jarruvarjon sekä aselokeron. [16; 19]

Ilmanottoaukkojen huulet ovat samantapaisesti muotoiltuja kuin F-22 Raptorissa. Ne ovat kolmessa eri kulmassa, mutta trapetsin muodolla on eri sivusuhte ja kulmat ovat katkaistu tylpän muotoiseksi (kuva 6). Tylppä muoto onkin häiveominaisuuksien kannalta hieman kyseenalainen. Muotoilu ei kuitenkaan näissä kohdissa yksinään pysty pienentämään tutkapoikkipinta-alaa riittävästi, joten tutkasignaalia absorboivia materiaaleja on käytettävä ilmanottoaukoissa. Moottoreiden ahtimien osat ovat suojattu edestäpäin katsottuna. Ilmanottoaukot ovat moottoreita alempana, jolloin syntyy S-mutka pystytasossa. Tällöin tutkasignaali heijastuu ilmanottoaukkojen kanavissa ja suoraa näköyhteyttä ahtimien osiin ei synny. [16; 19]

Suhoi PAK FA-hävittäjässä käytettävistä tutkasignaalia absorboivista materiaaleista ja maaleista on hyvin vähän tietoa julkisuudessa. Sen vuoksi niiden mahdollisesta käytöstä voidaan tehdä vain oletuksia. Ohjaamon kuomu sekä kuomun ja luukkujen ympärillä on

käytettävä näitä materiaaleja ja sahalaitarakenteita, jotta häiveominaisuudet säilyisivät. Kuomu on käsitelty nanotekniikalla valmistetulla pinnoitteella, joka sisältää muun muassa kultaa. Se pienentää kuomun tutkapaikkipinta-alaa noin 40–60 %. [19]

Hävittäjässä ei ole ainakaan kuvien perusteella käytetty lainkaan sahalaitatekniikkaa luukkujen ympärillä vaikka aseistus on piilotettu runkoon luukkujen taakse. Materiaaleja on myös käytettävä rungon ja siipien reunoissa, josta tutkasignaali voisi heijastua takaisin vastaanottimelle. Tässä ongelmakohtaksi muodostuu PAK FA:ssa käytetty liikkuva LEX (liite 1, kuva 13). Siiven johtoreunoissa rungon välittömässä läheisyydessä olevat pinnat liikkuvat pystytasossa, jolloin näiden pintojen saranakohdat voivat aiheuttaa tutkasignaalihiikkejä. [16]

### 3.4 Chengdu J-20



Kuva 7. Chengdu J-20 [15]

Kiinalaisten vastaus viidennen sukupolven hävittäjien kehitykseen on Chengdu J-20, joka lensi ensilentonsa tammikuussa 2011 ja on arvioitu otettavan operaatiokäyttöön vuonna 2017. Ulkonäöllisesti tämä hävittäjä muistuttaa hyvin paljon molempia Yhdysvaltojen viidennen sukupolven hävittäjiä, mutta on kuitenkin tämän vertailun suurin sekä ainut canardeilla ja deltasiivellä varustettu. Yhdysvallat syyttävätkin kiinalaisia häiveteknologian varastelusta muun muassa Serbiassa vuonna 1999 pudonneen F-117 Nighthawkin sekä F-35 JSF kehitysohjelmaan kohdistuvien tietoturvahyökkäyksien takia. [8; 15]

Edestäpäin katsottuna (kuva 7) voidaan todeta, että kyseessä on häiveominaisuuksilla varustettu hävittäjä. Suurin osa muodoista on kulmikkaita ja tasaisia eikä pyöreitä muotoja juurikaan ole. Nokka on selvästi erotettu terävällä reunalla ylä- ja alarungon välillä ja rungon sivut ovat samassa kulmassa sivuvakaajien kanssa. Siipien ja rungon liittymäkohdat ovat

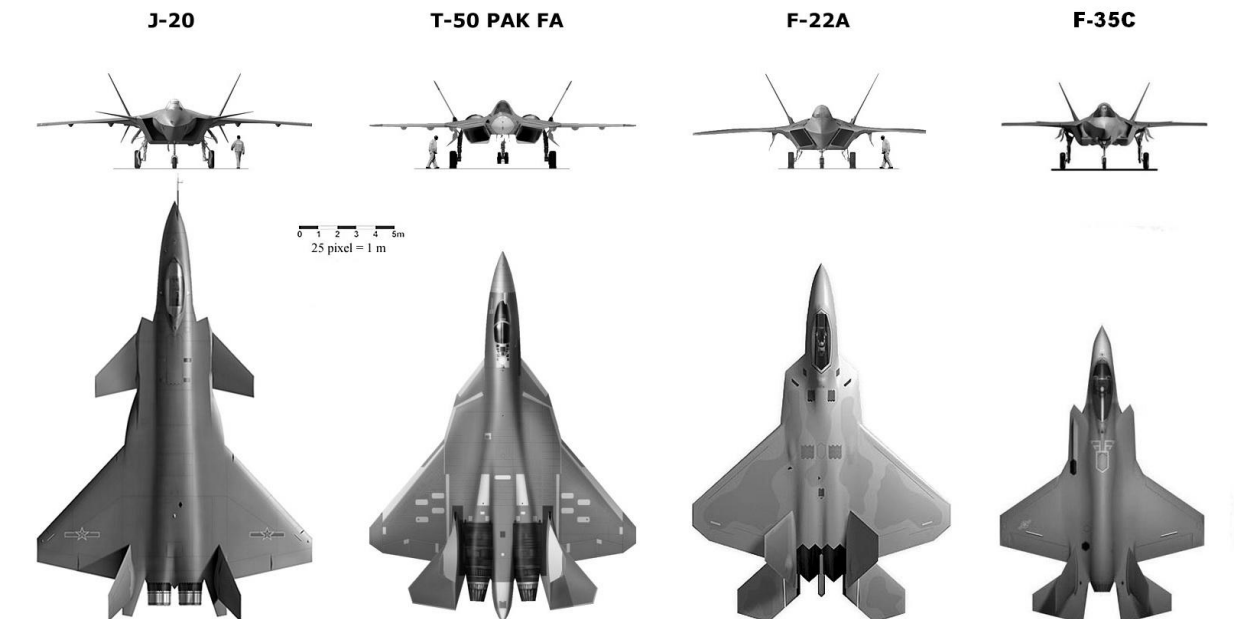
terävät ja kulmikkaat sekä rungon pohja on tasainen ilman mitään ylimääräisiä kuhmuja (liite 1, kuva 14). Canardien V-kulmat ovat eri kulmassa kuin siipien (kuva 7), mutta niiden johtoreunat ovat samassa nuolikulmassa (kuva 8). Canardien jättöreunat ovat samassa kulmassa kuin vastakkaisen puolen siiven jättöreuna (kuva 8). Canardien vaikutuksesta tutkapaikkipinta-alaan kiistellään paljon, mutta niiden ei pitäisi tuottaa minkäänlaista ylimääräistä lisää siihen. J-20-hävittäjässä ei ole lainkaan erillisiä korkeusvakaajia, joten canardit eivät siis ole ylimääräisiä ohjainpintoja, vaan korkeusvakaajien korvaajia. [15]

Chengdu J-20 hävittäjässä on, kuten kaikissa muissakin viidennen sukupolven hävittäjissä, asekuorma piilotettu luukkujen taakse runkoon. Tässä kiinalaisilla on todennäköisesti etumatkaa, sillä J-20-hävittäjän runko on vertailun suurin, jolloin polttoainetta ja asekuormaa voidaan lisätä enemmän. Sekä aselokeroiden että laskutelineiden luukut ovat tehdyt sahalaitaisiksi, jotta tutkapaikkipinta-alaa saataisiin pienennettyä. Aselokeroiden luukkujen toiminta ohjusta laukaistessa on viety askelta pidemmälle kuin Yhdysvalloissa. Luukut ovat auki vain sen ajan, kun ohjusta tuodaan rungosta ulos. Kun ohjus on ulkona, luukut sulkeutuvat jättäen ohjuksen rungon ulkopuolelle. Ohjuksen laukaisun jälkeen, luukut aukeavat taas ja ohjuksen teline tuodaan takaisin rungon sisäpuolelle (liite 1, kuva 15). Tämä ratkaisu on yksinkertaisempi ja todennäköisesti halvempi kuin F-22 Raptorissa oleva LOAL-järjestelmä (Lock On After Launch). [4; 15]

Ilmanottoaukot J-20-hävittäjässä ovat risteytys sekä F-22- että F-35-hävittäjien ilmanottoaukoista (kuva 7). Ne ovat, kuten F-22 Raptorissa, trapetsinmuotoiset kolmessa eri kulmassa, mutta koko on suurempi. Ilmanottoaukoissa rungon puolella oleva kuhmu on tuttu F-35-hävittäjän ilmanottoaukoista ja se estää suoran näköyhteyden moottoreiden ahtimien osiin. Takasektorista häiveominaisuudet eivät välttämättä ole parhaat mahdolliset. Suihkusuuttimet ovat pyöreät ilman minkäänlaista muotoilua pienentääkseen tutkapaikkipinta-alaa. Moottori ei kuitenkaan välttämättä ole vielä lopullinen versio sillä Kiinalla on ollut ongelmia tuottaa riittävän tehokkaita moottoreita. Julkisuudessa olevan tiedon mukaan J-20-hävittäjän prototyypeissä on käytetty venäläisiä AL31FN- sekä kiinalaisia WS10G-moottoreita. [8; 15]



### 3.5 Yhteenveto



Kuva 8. Tutkielmassa olevat viidennen sukupolven hävittäjät [14]

Suurin yhtäläisyys näiden neljän viidennen sukupolven hävittäjien välillä on niiden nokan muotoilu etusektorista katsottuna. Tästä poikkeaa eniten venäläisten ratkaisu Suhoi PAK FA-hävittäjässä. Ylhäältäpäin katsottuna muotoilusta poikkeaa eniten kiinalaisten ratkaisu canardeilla ja deltasiivellä. Kaikissa hävittäjissä on pintojen reunojen kulmia pyritty asettamaan samoihin kulmiin. Chengdu J-20 on vertailun ainut hävittäjä, jossa ohjainpintojen jättöreunat ovat samassa kulmassa kuin vastakkaisen puolen ohjainpinnan jättöreuna. Kaikissa muissa hävittäjissä jättöreunojen kulmat ovat identtiset saman puolen ohjainpinnan kanssa.

Rungon muotoilussa Yhdysvaltojen F-22 Raptor ja Kiinan Chengdu J-20 on selvässä etulyöntiasemassa. Näiden hävittäjien rungon pohja sekä siipien ja rungon liittymäkohdat ovat tasaisia ja terävillä kulmilla muotoiltuja, mikä on erittäin hyvä tutkapeikkipinta-alan pienentämisen kannalta. Yhdysvaltojen F-35 Lightning II ja Venäjän Suhoi PAK FA-hävittäjissä rungon pohja sekä siipien ja rungon liittymäkohdat ovat todella epätasaiset.

Kaikissa vertailun hävittäjissä on mahdollisuus kantaa aseistus rungon sisällä luukkujen takana. Sahalaitatekniikkaa on myös käytetty ahkerasti aselokeroiden ja laskutelineiluukkujen reunoissa kaikissa paitsi venäläisessä Suhoi PAK FA-hävittäjässä. F-35-hävittäjässä sahalaitatekniikkaa ei ole kuitenkaan käytetty laskutelineiden luukuissa. Hävittäjiin on mahdollisuus asentaa ulkoista kuormaa tarpeen tullen, mutta tällöin häiveominaisuudet kärsivät.

Moottoreiden ilmanottoaukoissa on kaikissa joitakin yhtäläisyyksiä. Ylhäältäpäin katsottuna J-20:sen ja F-35:sen ilmanottoaukkojen reunat ovat melkein samanlaiset, kun taas vastaavasti PAK FA:n ja F-22:sen ovat keskenään samantapaiset. Edestäpäin katsottuna PAK FA:n ilmanottoaukot ovat muodoltaan erilaiset, mutta kuitenkin samalla tavalla asetettu kolmeen eri kulmaan kuten J-20- ja F-22-hävittäjissä. J-20- ja F-35-hävittäjissä on molemmissa ilmanottoaukoissa rungon puolella pieni kuhmu, joka estää osittain tutkasignaalien suoran pääsyn moottoreiden ahtimien osiin. Kaikissa hävittäjissä on pyritty piilottamaan moottoreiden ahtimien osat edestäpäin tulevalta tutkasignaalityliltä. J-20- sekä F-35-hävittäjissä on käytetty vaakatasossa kaartuvia ilmanottoaukkoja, kun taas PAK FA:ssa on käytetty pystytasossa kaartuvia. F-22 Raptorissa on käytetty sekä vaaka- että pystytasossa kaartuvia ilmanottoaukkoja.

Moottoreiden suihkusuuttimissa löytyy suuriakin eroja. J-20- ja PAK FA-hävittäjien suihkusuuttimet ovat muodoltaan identtiset, eli pyöreät ilman sahalaitarakennetta. PAK FA:ssa on kuitenkin kolmessa suunnassa suuntautuvat suihkusuuttimet, kun J-20-hävittäjässä on kiinteät ainakin toistaiseksi. F-22 Raptorissa on panostettu eniten suihkusuuttimien häiveominaisuuksiin rakentamalla neliskulmaiset kahdessa suunnassa suuntautuvat suihkusuuttimet, joiden ympärillä on sahalaitaista tutkasignaalia absorboivaa materiaalia. F-35:sen suihkusuutin on pyöreä, mutta siinä on käytetty sahalaitaista tutkasignaalia absorboivaa materiaalia pienentämään tutkapoikkipinta-alaa.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä kandidaatin tutkielmassa tutkittiin viidennen sukupolven hävittäjien häiveteknologian toteutusratkaisuja. Tutkittiin miksi häiveteknologiaa tarvitaan käsittelemällä tutkan toimintaperiaatetta ja häiveteknologian perusteita sekä vertailtiin, miten häiveteknologia on toteutettu viidennen sukupolven hävittäjissä. Vaikkakin viidennen sukupolven hävittäjiä kehitellään monissa eri maissa, on tässä tutkielmassa käsitelty vain Yhdysvaltojen, Venäjän sekä Kiinan hävittäjiä. Aihe on hyvin ajankohtainen, sillä Suomen ilmavoimien seuraava hävittäjä voi mahdollisesti edustaa viidettä sukupolvea häiveteknologialla varustettuna.

Tutkan toiminta perustuu radioaaltojen lähetykseen ja vastaanottamiseen. Aallon osuessa kohteeseen, se heijastuu eri suuntiin riippuen kohteen muotoilusta ja materiaaleista. Se, mitä tutka havaitsee kohteesta, kuvaa kohteen tutkapaikkipinta-alaa. Tutkapaikkipinta-alaan on mahdollista vaikuttaa muodoilla, materiaaleilla ja maaleilla. On vältettävä sylinterimäisiä muotoja, sillä niistä tutkasignaali heijastuu joka suuntaan. Häiveominaisuuksiltaan paras vaihtoehto on mahdollisimman kulmikkaat muodot, jotka ovat asetettu tiettyihin kulmiin. Muotojen lisäksi voidaan käyttää erilaisia materiaaleja ja maaleja paikoissa, joissa muodon antamat häiveominaisuudet eivät riitä. Materiaalit ja maalit absorboivat tutkasignaalia, jolloin se ei heijastu takaisin tutkan vastaanottimille.

Jos tutkakatveessa ei ole mahdollista lentää, on ainut mahdollisuus vaikuttaa vihollisen tutkien suorituskykyyn pienentämällä hävittäjän tutkapaikkipinta-alaa. Tämä käy ilmi aikaisemmin esittelystä tutkakaavasta (4). Tästä syystä häiveteknologia nousee nykyaikaisessa sodankäynnissä hyvin tärkeään asemaan. Ei kuitenkaan riitä, että tutkapaikkipinta-alaa pienennetään muutaman prosenttiyksikön verran, sillä sen vaikutus on hyvin pieni tutkan havaitsemisetaisyteen. Kuten taulukko 1 näyttää, on tutkapaikkipinta-alaa pienennettävä 95 %, jotta tutkan havaitsemisetaisyys putoaisi puoleen. Viidennen sukupolven hävittäjissä onkin suunniteltava jokainen pieni tutkasignaalia heijastava pinta huolella, jotta häiveominaisuudet olisivat parhaat mahdolliset. Pienikin huonosti suunniteltu huoltoluukun ruuvi voi heijastaa tutkasignaalia vastaanottimen suuntaan ja täten pilata hävittäjän häiveominaisuudet.

Viidennen sukupolven hävittäjät poikkeavat ulkonäöllisesti hyvin paljon aikaisemmista häiveteknologialla varustetuista lentokoneista. Lockheed Martinin F-117 Nighthawk ja Northrop Grummanin B-2 Spirit lentokoneet ovat pommikoneita, joten niiltä ei vaadita hyvää liikehtimiskykyä eikä ylläni nopeuden lento-ominaisuuksia. Viidennen sukupolven hävittäjistä

on puolestaan kehittyneillä tietokoneilla kyetty valmistamaan sen muotoisia, että tutkapoikkipinta-ala on edeltäjiinsä verrattuna pienempi samalla kuin liikehtimiskyky säilyy.

Viidennen sukupolven hävittäjissä on myös pyritty kustannustehokkaampaan häiveteknologiaan. Kustannustehokkaammalla häiveteknologialla tarkoitetaan, että kalliita tutkasignaalia absorboivia materiaaleja ja maaleja pyritään käyttämään vähemmän ja luotettaisiin enemmän muodon antamiin häiveominaisuuksiin. Aikaisemmissa häivelentokoneissa suurimmat kustannukset aiheuttivat juuri näiden materiaalien ja maalien huolto sekä ylläpito [3, s. 78].

Viidennen sukupolven hävittäjien häiveteknologia on toteutettu Yhdysvalloissa, Venäjällä ja Kiinassa hyvin samankaltaisella tavalla. On paljon yhtäläisyyksiä, mutta eroavaisuuksiakin on löydettävissä. Suoraan ei voi luokitella, mikä on länsimainen ja mikä itämainen toteutustapa häiveteknologian osalta. Kaikissa hävittäjissä on jollain tasolla käytetty teräviä liittymäpintoja, asetettu reunoja ja pintoja samoihin kulmiin, piilotettu aseistus luukkujen taakse sekä muotoiltu moottorien ilmanottoaukot kaareviksi. Melkein kaikissa hävittäjissä on tämän lisäksi käytetty luukkujen ympärillä sahalaitatekniikkaa. Suurimmat erot hävittäjien häiveteknologian toteutuksessa on löydettävissä luukkujen ja moottoreiden ratkaisuista.

Luukkujen toteutusratkaisuissa Yhdysvallat on käyttänyt ahkerasti sahalaitatekniikkaa ja häivemateriaaleja luukkujen ympärillä paitsi F-35:sen laskutelineiden luukuissa. Ohjusta laukaistessa Yhdysvaltojen hävittäjissä aselokeroiden luukut ovat auki joko koko ohjuksen lukitusprosessin ajan tai sitten ohjus laukaistaan saman tien luukkujen auetessa. Venäläisillä sen sijaan ei ole minkään laista sahalaitamuotoilua luukkujen ympärillä eikä ohjustenlaukaisu järjestelmistä ole tietoa julkisuudessa. Kiinan hävittäjällä on, kuten Yhdysvalloillakin sahalaitatekniikkaa kaikissa luukuissa, mutta ohjuksenlaukaisujärjestelmä on tehty yksinkertaisemmaksi. Aselokeroiden luukut ovat kiinalaisten viidennen sukupolven hävittäjässä auki vain sen ajan, kun ohjusta tuodaan rungosta ulos.

Moottoreiden osalta kaikissa vertailun hävittäjissä on pyritty piilottamaan ahtimen osat edestäpäin katsottuna kaarevilla ilmanottoaukoilla. Eroavaisuudet esiintyvät katsottaessa hävittäjien suihkusuuttimia takasektorista. Yhdysvaltojen hävittäjät ovat ainoat joissa on pyritty pienentämään suihkusuuttimien aiheuttamaa tutkapoikkipinta-alaa. F-22 Raptorissa on käytetty neliskulmaisia suihkusuuttimia joiden ympärille on asennettu sahalaitaista tutkasignaalia absorboivaa materiaalia. F-35:ssä on pyöreä suihkusuutin, mutta siinä on kuitenkin käytetty tutkasignaalia absorboivaa sahalaitarakennetta. Kiinalaisten ja venäläisten viidennen

sukupolven hävittäjät käyttävät pyöreitä suihkusuuttimia ilman minkäänlaista muotoilua tutkapoikkipinta-alan pienentämiseksi.

Häiveteknologian kopiointi maiden välillä pitää hyvinkin paikkansa, jos vertailee kiinalaisten hävittäjää molempiin Yhdysvaltojen hävittäjiin. Eteenkin etusektorista katsottuna kiinalaiset ovat tehneet hävittäjästään risteytyksen Yhdysvaltojen F-22:sta ja F-35:sta. Venäläisillä puolestaan näyttäisi olevan melko paljon omia ratkaisuja muotoilun osalta varsinkin, kun katsoo moottoreiden ilmanottoaukkojen sijoittelua ja muotoilua. Suhoi PAK FA-hävittäjässä on kuitenkin ylhäältäpäin katsottuna myös paljon yhtäläisyyksiä Yhdysvaltojen F-22 Raptor-hävittäjän kanssa. Pelkän muotoilun kopioiminen ei kuitenkaan vielä täytä häiveteknologian varastelun kriteereitä, sillä vihollinen on varmasti osannut ottaa koelennoista valokuvia. Materiaaleja ja maaleja sekä piilossa olevia rakenteita vertailemalla, voitaisiin tehdä tarkempia johtopäätöksiä häiveteknologian mahdollisesta varastamisesta.

Jos nämä neljä viidennen sukupolven hävittäjää pitäisi asettaa paremmuusjärjestykseen häiveominaisuuksien osalta, olisi järjestys F-22 Raptor, Chengdu J-20, F-35 Lightning II sekä viimeisenä Suhoi PAK FA. Häiveominaisuudet toki vaihtelevat koneittain riippuen siitä, mistä suunnasta ominaisuuksia tarkastelee. F-22- ja J-20-hävittäjissä vahvuutena ovat tasaiset pinnat. Rungon pohja ja sivut sekä siipien ja rungon liittymäkohdat ovat näissä kahdessa hävittäjissä huomattavasti paremmin muotoiltu kuin F-35- tai PAK FA-hävittäjissä. F-22 Raptor vie kuitenkin voiton paremmin muotoiltujen moottoreiden suihkusuuttimien takia. F-35- ja PAK FA-hävittäjissä heikkoutena on rungon pohjan sekä siipien ja rungon liittymäkohtien epätasainen muotoilu. Näiden kahden välillä F-35 vie voiton paremmin suojatun moottorin suihkusuuttimen sekä aselokeroiden luukuissa käytetyn sahalaitatekniikan takia. Tästä huomaa, että fyysisellä koolla ei ole juurikaan merkitystä tutkapoikkipinta-alaan [6, s. 6]. F-35 Lightning II on tämän vertailun fyysiseltä koolta pienin hävittäjä, kun taas Chengdu J-20 on suurin.

Tärkeintä on huomioida, että nämä viidennen sukupolven hävittäjät ovat vielä kehitysvaiheessa lukuun ottamatta Yhdysvaltojen F-22 Raptoria, joka otettiin operaatiokäyttöön vuonna 2005. Tästä syystä hävittäjiä voidaan vielä muokata jonkin verran. Tämä huomattiin jo Lockheed Martinin F-35-hävittäjän pohjan muotoilussa sekä Chengdu J-20-hävittäjän moottoreiden valinnassa. Mitään suuria muutoksia ei kuitenkaan todennäköisesti enää tehdä, sillä hävittäjien on tarkoitus olla operaatiokäytössä jo ennen 2020-lukua. Tutkasignaalia absorboivien materiaalien ja maalien käyttö voi muuttua paljonkin, mutta sitä tuskin paljastetaan ulkopuolisille eikä sitä voida havaita kuvia katsomalla.

Edellä mainitusta syystä ei kovin tarkkaa tutkimusta voi vielä tehdä. Lisää tutkimusta kaivataan, kun hävittäjät ovat valmiita ja operaatiokäytössä 2020-luvulla. Silloinkaan ei välttämättä vielä voida kaikista materiaaleista saada tietoa turvaluokituksen takia, kuten jo kohta kymmenen vuotta palveluksessa olleen F-22 Raptorin kohdalla voidaan todeta. Jos näitä salaisuuksia vuotaa julkisuuteen liian aikaisin, voi se johtaa kyseisen lentokonetyypin ennenaikaiseen palveluksesta poistumiseen.

## LÄHTEET

- [1] Aaronstein, D., Hirschberg, M., Piccirillo, A. *Advanced tactical fighter to F-22 Raptor: Origins of the 21st century air dominance fighter*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998. 308 s. ISBN 978-160-086-790-3 (e-book).
- [2] Bristol Groundschool JAA ATPL course. *Radio navigation*. 2012.
- [3] Cadirci, S. *RF Stealth (or low observable) and counter-RF stealth technologies: Implications of counter-RF stealth solutions for Turkish Air Force*. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2009. 141 s.
- [4] Cenciotti, D. *China's new stealth fighter's missile launch rails prove Beijing can improve U.S. technology*. The Aviationist, 26.3.2013. [Viitattu 22.11.2013]. Saatavissa: <http://theaviationist.com/2013/03/26/j20-rails>
- [5] Crosby, F. *The world encyclopedia of bombers*. London: Annes Publishing, 2004. 256 s. ISBN 978-1-84477-511-8.
- [6] Dranidis, D. V. *Airborne stealth in a nutshell - part I*. The Magazine of the Computer Harpoon Community, 2/3.2013. [Viitattu 23.11.2013]. Saatavissa: [http://www.harpoonhq.com/waypoint/articles/Article\\_021.pdf](http://www.harpoonhq.com/waypoint/articles/Article_021.pdf)
- [7] Goodall, J. *F-117 stealth in action*. Carrollton, Texas: Squadron/Signal Publications, Inc., 1991. 50 s. ISBN 0-89747-259-4.
- [8] Hsu, B. *China's J-20 fighter might need Russian engines*. AINOnline, 8.3.2013. [Viitattu 22.11.2013]. Saatavissa: <http://www.ainonline.com/aviation-news/ain-defense-perspective/2013-03-07/chinas-j-20-fighter-might-need-russian-engines>
- [9] Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E., Pitkänen, M. *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025, 9E 2025, osa1, Teknologian kehitys*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2008. 564 s. ISBN 978-951-25-1889-0.

- [10] Klemola, O., Lehto, A. *Tutkatekniikka*. 3. korjattu painos. Helsinki: Hakapaino Oy, 2006. 275 s. ISBN 951-672-278-4.
- [11] Kopp, C. *Assessing Joint Strike Fighter defence penetration capabilities*. Air Power Australia Analyses, 7.1.2009. [Viitattu 15.5.2013]. Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/APA-2009-01.html>
- [12] Kopp, C., Goon, P. *Chengdu J-XX [J-20] Stealth Fighter Prototype, A Preliminary Assessment*. Air Power Australia Analyses, 3.1.2011. [Viitattu 15.8.2013]. Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/APA-J-XX-Prototype.html>
- [13] Kopp, C., Goon, P. *Sukhoi 14-FA Imagery and Multimedia*. Air Power Australia Analyses, 10.3.2010. [Viitattu 15.8.2013]. Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/APA-14-FA-Multimedia.html>
- [14] Pakistan Defence. *Combat Aircraft Projects & Designs*. 14.4.2012 [Viitattu 15.8.2013]. Saatavissa: <http://www.defence.pk/forums/air-warfare/75408-combat-aircraft-projects-designs-index-2nd-post-49.html>
- [15] Pelosi, M., Kopp, C. *A Preliminary Assessment of Specular Radar Cross Section Performance in the Chengdu J-20 Prototype*. Air Power Australia Analyses, 4.7.202011. [Viitattu 15.8.2013]. Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/APA-2011-03.html>
- [16] Pelosi, M., Kopp, C. *A Preliminary Assessment of Specular Radar Cross Section Performance in the Sukhoi T-50 Prototype*. Air Power Australia Analyses, 12.11.2012. [Viitattu 15.5.2013]. Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/APA-2012-03.html>
- [17] Puolustusvoimat. *Hornetin seuraajasta tarvitaan valintapäätös vasta 2020-luvun alkuvuosina*. Ilmavoimat, 2.1.2012 [Viitattu 8.5.2013]. Saatavissa: [http://www.puolustusvoimat.fi/portal/puolustusvoimat.fi!/ut/p/c5/vZDJcrJQEIWfJQ-At4HLtOQXvCIyCFwZNhYiRQAhxIHp6eNfWWURVyn7LE91f300StBDbdqXRxorP9r0jCKUiAfCifJ6A6xCWFsGwwlcjngrIFREIYoAH\\_xq6oy5nr0KBrjWw2hd4sHSVo59tAafTmOgxZNf32y7ymZ\\_ppNNZQBZYferna6a1yjO6dvjVvKD5](http://www.puolustusvoimat.fi/portal/puolustusvoimat.fi!/ut/p/c5/vZDJcrJQEIWfJQ-At4HLtOQXvCIyCFwZNhYiRQAhxIHp6eNfWWURVyn7LE91f300StBDbdqXRxorP9r0jCKUiAfCifJ6A6xCWFsGwwlcjngrIFREIYoAH_xq6oy5nr0KBrjWw2hd4sHSVo59tAafTmOgxZNf32y7ymZ_ppNNZQBZYferna6a1yjO6dvjVvKD5)



[pjWvwtdtC3tp67JLAs99YL99kddN3SaYJe4Sg-FrVAmoxP\\_9tm-40nfPvwyKqAYJdJvbcggouAP23jOEI7HkuGFuaTXsQh-YYfcC1nsn7I2KCmPzWLIimgUsRBk4EWOs8ALmACsoPMZXaXU1Bk31e\\_zu fcYSR1sj2JXZblf4vORFBnObTuqOOvxdcqtcUdzkTvXltrynch-xKhbUEHdlYYZOzKjG2CZRrsS1qK1w2W0UemiOjmdX-nHTVPr2LiS7UUgyukh2IdSK8ejMIYVO3BptWa8YoLuek0rJTO10sPeb1VKzHfpiAhvGYvY-8mBMmXXHnYLN8ZLPXH02OuqbvdG89Rz-Uq1\\_kMq6l/dl3/d3/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/?pcid=a29d238043e684ad9c22fec766e257a6](http://pjWvwtdtC3tp67JLAs99YL99kddN3SaYJe4Sg-FrVAmoxP_9tm-40nfPvwyKqAYJdJvbcggouAP23jOEI7HkuGFuaTXsQh-YYfcC1nsn7I2KCmPzWLIimgUsRBk4EWOs8ALmACsoPMZXaXU1Bk31e_zu fcYSR1sj2JXZblf4vORFBnObTuqOOvxdcqtcUdzkTvXltrynch-xKhbUEHdlYYZOzKjG2CZRrsS1qK1w2W0UemiOjmdX-nHTVPr2LiS7UUgyukh2IdSK8ejMIYVO3BptWa8YoLuek0rJTO10sPeb1VKzHfpiAhvGYvY-8mBMmXXHnYLN8ZLPXH02OuqbvdG89Rz-Uq1_kMq6l/dl3/d3/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/?pcid=a29d238043e684ad9c22fec766e257a6)

- [18] Sandqvist, A., Gerdle, P. *Lärobok i telekrigföring för luftvärnet, radar och taktik*. Malmö: Elanders Berlings, 2004. 438 s. ISBN 7741-850101.
- [19] Scott, P. *Aviation to the MAKs!*. RT Technology Update, 27.9.2013 [Viitattu 21.11.2013]. Saatavissa: <http://rt.com/shows/technology-update/russia-aviation-maks-airshow-401/>
- [20] Sweetman, B. *Lockheed Stealth*. St. Paul, Minnesota: Zenith Press, 2004. 168 s. ISBN 0-7603-1940-5.
- [21] Sweetman, B. *Stealth aircraft, secrets of future airpower*. Osceola, Wisconsin: Motorbooks International Publishers & Wholesalers Inc., 1986. 96 s. ISBN 0-87938-208-2.
- [22] Sweetman, B. *Ultimate fighter, Lockheed Martin F-35 Joint Strike Fighter*. St. Paul, Minnesota: Zenith Press, 2004. 160 s. ISBN 0-7603-1792-5.

**LIITTEET**

Liite 1: Kuvia

Liite 2: Lyhenteet



Kuva 9. Lockheed Martin F-22 Raptorin pohja [11]



Kuva 10. Lockheed Martin F-35 Lightning II-hävittäjän prototyyppi X-35 [11]



Kuva 11. Suhoi PAK FA-hävittäjän pohja [13]



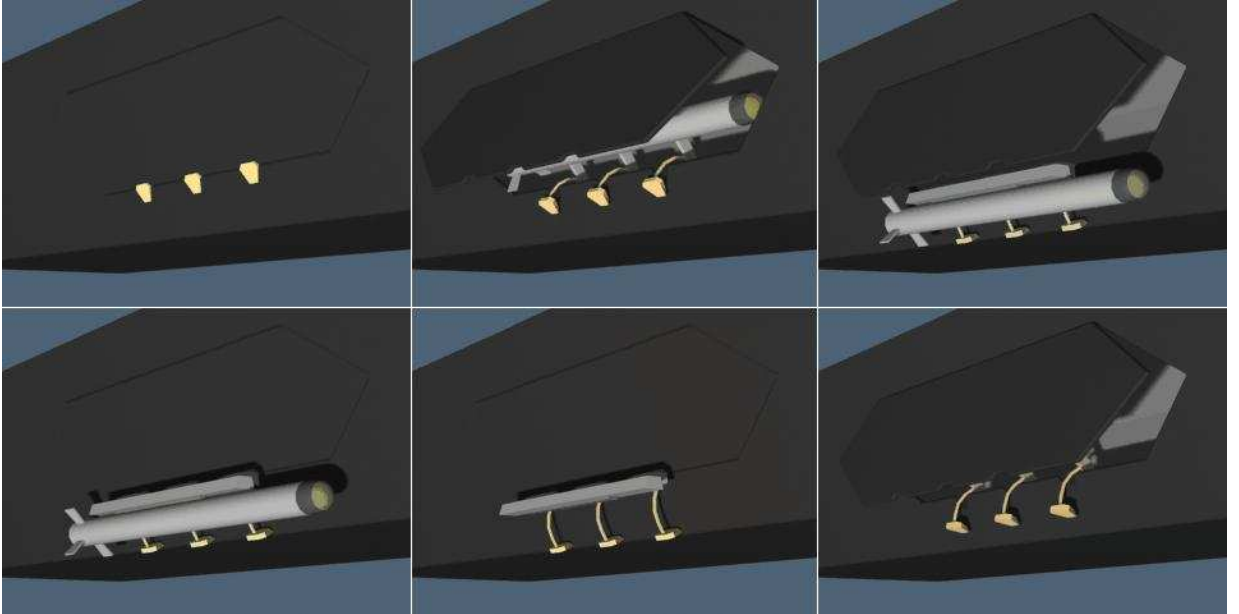
Kuva 12. Suhoi PAK FA-hävittäjän perä [16]



Kuva 13. Suhoi PAK FA-hävittäjän liikkuvat LEX:it ala-asennossa [19]



Kuva 14. Chengdu J-20-hävittäjän pohja [15]



Kuva 15. Chengdu J-20-hävittäjän ohjuksenlaukaisu [4]

## Lyhenteet

|        |   |
|--------|---|
| A      | Attack  |
| AIM    | Air Intercept Missile                             |
| AMRAAM | Advanced Medium-Range Air-toAir Missile           |
| ATF    | Advanced Tactical Fighter                         |
| B      | Bomber  |
| BVR    | Beyond Visual Range                               |
| CW     | Continious Wave                                   |
| EHF    | Extremely High Frequency                          |
| F      | Fighter   |
| IEEE   | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| JEM    | Jet Engine Modulation                             |
| JSF    | Joint Strike Fighter                              |
| LEX    | Leading Edge Extension                            |
| LO     | Low Observable                                    |
| LOAL   | Lock On After Launch                              |
| LOAN   | Low Observable Asymmetric Nozzle                  |
| RADAR  | RADio Detection And Ranging                       |
| RAM    | Radar Absorbent Material                          |
| RAP    | Radar Absorbent Paint                             |
| RAS    | Radar Absorbent Structure                         |
| RCS    | Radar Cross Section                               |
| SHF    | Super High Frequency                              |
| SR     | Strategic Reconnaissance                          |
| STOVL  | Short Take-Off and Vertical Landing               |
| UHF    | Ultra High Frequency                              |
| VLO    | Very Low Observable                               |
| WVR    | Within Visual Range                               |